

电动汽车储能技术应用潜力及功能定位研究

刘坚

(国家发展和改革委员会能源研究所, 北京市 西城区 100038)

An Analysis on the Application Potential and Position of Electric Vehicle Energy Storage

LIU Jian

(Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, Xicheng District, Beijing 100038, China)

Abstract: With the fast growth of the electric vehicle (EV) industry and the development of battery technology, the potential of EVs in delivering energy storage services is increasingly garnering attention in the energy sector. By adjusting the charging behavior, EV storage can provide multiple values to the power system and promote the application of renewable energies. However, quantitative studies on EV storage capacity, particularly considering the influences of the driving and parking behaviors of EV users, are still limited. This paper therefore evaluates the potential capacity of EV storage for accommodating the large-scale renewable energy generated in China based on the driving behavior of different types of vehicles. In addition, the differences between EV storage and stationary energy storage are discussed, which could be acknowledged by policy makers in the process of long-term energy policy formulation.

Keywords: electric vehicle storage; stationary energy storage; driving behavior; parking behavior; renewable energy

摘 要: 随着电动汽车的普及和电池技术不断成熟, 电动汽车作为分布式储能的应用前景日益受到关注。通过对电动汽车充放电功率的合理引导和调度, 电动汽车可向电力系统提供调频、调峰等功率及能量型调节服务, 从而提高电力系统对波动性可再生能源的利用水平。然而, 各国对电动汽车储能潜力的定量评估研究较少, 以往有限研究对不同车型种类、车主用车行为等因素的影响分析不足。因此, 基于中国未来电动汽车发展预测, 结合各类车型出行及停车行为特征, 预测了未来大规模电动汽车储能潜力, 并对电动汽车储能与可再生能源协同的效果进行了评估。此外, 就电动汽车储能与固定式储能在电力系统中的功能定位问题进行了对比分析, 为后续电动汽车储能发展战略及相关政策制定提供了决策参考。

关键词: 电动汽车储能; 固定式储能; 出行行为; 停车行为; 可再生能源

0 引言

电动汽车与电网彼此天然连通, 既是电能消费终端, 又是位于电网末梢的储能单元。大量电动汽车可作为分布式储能为电力系统提供规模可观的灵活性资源, 进而有效提升电力系统对波动性可再生能源的消纳能力。

近年来全球电动汽车市场快速成长, 产业规模日益扩大。2018年全球电动乘用车保有量超过500万辆^[1]。其中, 中国电动汽车市场增速尤为突出。2018年中国新能源汽车销量达到125.6万辆, 相比2015年提高近3倍^[2]。数量规模的增长为电动汽车参与电力系统储能提供了条件。截至2018年底, 全国电动汽车动力电池累计产量超过2亿kWh, 而同期全国电化学储能累计装机量仅为100万kW, 按储能平均放电4 h计算, 则动力电池存量规模高达电化学储能的50倍。当前锂离子电池能量密度、循环寿命等关键参数呈现快速进步的趋势, 其成本仍有较大下降空间, 特别是未来电动汽车数量将保持增长, 其参与电力系统储能的潜力有望持续扩大。

随着车辆数不断增长, 电动汽车储能已被政府提上议事日程。国家发改委《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》^[3]已明确提出鼓励电动汽车提供储能服务并通过峰谷价差获得收益, 电动汽车正越来越多地通过电力需求响应等方式与电网形成互动。

然而, 现有电动汽车与电网互动的研究往往是针对特定案例的互动方式优化, 对全国电动汽车储能潜力的定量评估研究较少。Dallinger等考虑了用户随机性下的电动汽车为电网运行提供备用的可行性, 发现车网互动可以在不影响电池寿命的前提下, 为系统提

供可靠的备用容量^[4]。Han等研究发现对电动汽车的充放电功率、时间进行集中优化控制，可平抑风电、太阳能发电波动，提高可再生能源利用率^[5]。与此同时，部分研究聚焦电动汽车储能经济性。Kempton等人分析了电动汽车作为分布式储能的可行性，发现通过协调控制充放电过程，电动汽车可向电力系统提供高价值调节服务^[6]。随着中国近年来电动汽车快速普及，电动汽车储能也成为研究焦点。自然资源保护协会（Natural Resource Defense Council, NRDC）根据上海市电力系统调峰需求与电动汽车用户出行特点，分别从电动汽车充电需求及负荷特性、电动汽车充放电调节潜力及经济性等方面进行了分析^[7]。此后，NRDC又针对电动汽车有序充电、车网互动、电池更换和退役电池储能4种方式，分析了电动汽车储能应用潜力和经济性^[8]。文献[9]也结合中国电动汽车数量规模预测，对电动汽车通过车网互动所能提供的储能规模潜力进行了评估。然而，以往研究一般集中在经济性调度模型的优化，缺少电动汽车储能规模的整体评估。此外，有限的电动汽车储能研究往往基于车辆技术参数展开，而较少考虑电动汽车用车/停车行为的影响^[10-12]。因此，本文将基于中国未来电动汽车发展预测，结合各类车型出行及停车行为特征，评估电动汽车储能的应用潜力。研究将聚焦电动汽车储能与大规模可再生能源之间的协同效果，并对比电动汽车储能与固定式储能在电力系统中的定位差异，为后续战略规划及政策制定提供参考。

除电池容量、充电设备功率外，电动汽车出行强度、停车时长、充电桩数量普及率等因素都直接对电动汽车储能实际效果产生约束。因此，本文尝试将上述因素纳入研究过程，定量评估电动汽车储能在电力系统中的应用潜力与价值。

1 电动汽车储能规模潜力

电动汽车数量、动力电池特性、用户用车行为等因素都将直接影响电动汽车的储能潜力。本章将首先对电动汽车数量规模和电池特性进行预测，进而结合用户行为评估电动汽车有序充电和车电互联的实际储能效果。

1.1 电动汽车数量规模

数量规模是电动汽车储能的首要影响因素。各国对电动汽车数量的预测研究也较多，其中中国汽车工

程学会《节能与新能源汽车技术路线图》的研究较具代表性，其预测到2030年全国新能源汽车销量占比将达到40%~50%，保有量将达到8000万辆^[13]，但该研究并未公布具体车型分布。由于各类车型的储能能力有较大差异，本文采用国家发改委能源研究所的保有量及分车型电池平均容量预测（表1），即到2030年全国电动汽车保有量达到8640万辆，其中电动乘用车占比93%^[14]。

表 1 2030年电动汽车数量规模预测		
Table 1 2030 EV stock and battery size forecast		
车型	保有量/万辆	平均电池容量/kWh
乘用车	8056	100
出租车	166	100
公交车	60	250
大客车	200	250
轻型物流车	158	150

1.2 电动汽车储能潜力评估

在不同车网互动模式下，电动汽车的储能潜力存在差异。本文聚焦有序充电和车电互联（vehicle to grid, V2G）两类车网互动方式，评估电动汽车储能技术潜力及关键影响因素。

1.2.1 有序充电

电动汽车有序充电是指根据电力系统的运行状态，以经济性最优或对电网影响最小等作为优化目标，综合考虑电池性能约束与用户充电需求，调整电动汽车充电时间和充电功率。

电动汽车可根据电力系统调节需求调整车辆的充电行为。电动汽车充电负荷具有与其他用电负荷不同的特性，通过对充电行为加以引导，可以起到灵活负荷的作用。虽然在有序充电下电动汽车无法向电网或负荷直接放电，但有序充电可促进电网削峰填谷，实现“虚拟储能”的作用。

电动汽车有序充电的规模潜力可从可调节容量及可充电电量两个维度衡量。可调节容量为接入电网电动汽车的最大充电功率，可充电电量为电动汽车道路出行所需的充电电量，而电动汽车充电电量又取决于车辆行驶里程、能效及充电效率等因素。在有序充电下，车辆的充电电量可根据电网需求在停车时段内分配，进而帮助电网调峰、提升配网运行可靠性和提升电力系统运行经济性。各国对电动汽车有序充电已有较多研究，现有研究表明：电动汽车具有较强的需求

响应能力,若对充电行为进行有序引导,大部分原本出现在午后至晚间的充电负荷可转移至凌晨时段,削峰填谷效果明显^[15-17]。

有序充电是目前技术较为成熟的电动汽车储能方式,适于在全电动车型领域推广。对于私家车、公务车队等出行强度小、停车时间较长的用车部门,参与有序充电的优势在于充电调节灵活度高;对于公交、出租及物流车队等运营强度高、运营时间规律的用车部门,参与有序充电的优势更多在于车辆充电量大且集中管控难度相对较低。目前中国一些地区已经开始针对住宅小区开展电动汽车有序充电工程示范。

为量化估算电动汽车储能能力,本文基于各类车型可用停车时间来评估电动汽车充电的灵活调节潜力。所谓可用停车时间即除去车辆行驶时间、刚性(车用电量)充电时间之外的时间长度,如图1所示。可用停车时间比例越高,则意味着电动汽车进行有序充电的潜力越大。

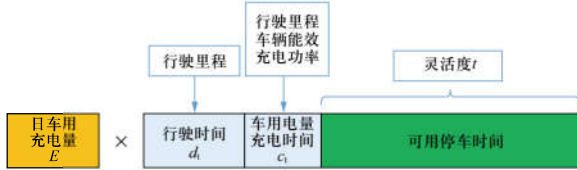


图1 有序充电潜力评估示意图

Fig. 1 Key factors on smart charging potential

因此,某车型 n 单辆电动汽车日均有序充电潜力可表示为:

$$SC_n = E_n \times \frac{T - d_{t,n} - c_{t,n}}{T} \quad (1)$$

式中: SC_n 为车型 n 日均有序充电潜力, kWh; E_n 为车型 n 日均充电电量, kWh; T 为计量周期, 24 h; $d_{t,n}$ 为车型 n 日均行驶时长, h; $c_{t,n}$ 为车型 n 日均充电时长, h。

1.2.2 V2G

V2G是指将电动汽车作为分布式储能单元,通过与电网的双向互动实现储能的作用,即电动汽车以充放电的形式参与电力系统调节。国外在电动汽车与电网的互动方面研究起步较早,而目前关于V2G的研究主要集中在电动汽车与电网互动方式、控制策略、成本效益分析及硬件研发等方面。

V2G车辆车载电池平均每天完成一次深度充放电,则其储能潜力同时取决于车辆充放电灵活度和可用电池容量,其中车辆充放电灵活度即电动汽车额定充放电功率与可用停车时间之积;可用电池容量即该

车型车载电池额定容量与日均车用充电量之差。两者较小值即为该类车型车网互动潜力(图2)。

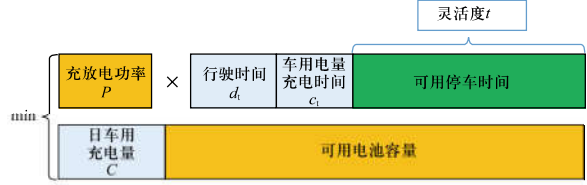


图2 V2G潜力评估示意图

Fig. 2 Key factors on vehicle to grid potential

因此,某车型 n 单辆电动汽车日均车网互动潜力可表示为:

$$V2G_n = \min \left\{ P_n \times \frac{T - d_{t,n} - c_{t,n}}{T}, C_n - E_n \right\} \quad (2)$$

式中: $V2G_n$ 为车型 n 日均车电互动潜力, kWh; P_n 为车型 n 日均额定充放电功率, kW; C_n 为车型 n 车载电池容量, kWh。

计算过程所涉及的关键参数包括电池容量、车辆出行强度、充放电功率等关键参数,如表2所示。

表2 各类车型关键参数假设
Table 2 Key parameters by vehicle types

车型	日行里程 /km	车辆能耗 / (kWh·km ⁻¹)	充放电功率 /kW	充电效率/%
乘用车	40	0.16	3.3	95%
出租车	300	0.16	60	95%
公交车	150	0.6	60	95%
大客车	120	0.6	60	95%
轻型物流车	80	0.3	60	95%

图3为电动汽车有序充电和V2G的日均调节能力估算结果。由于车载电池容量远高于车用日均充电量,则V2G日均调节能力也明显更高。到2030年,V2G日均调节能力为2653 GWh,是有序充电的5.9倍。分车型看,乘用车凭借93%的车辆数占比提供了77%的电动汽车储能规模。

需要注意的是,电动汽车储能存在时间周期限制,即一次长距离出行可打断电动汽车的储能周期。本文假设电动汽车储能的可调节周期为单次充电可满足的车辆出行天数。有序充电储能周期 $T_{sc,n}$ 和V2G储能周期 $T_{V2G,n}$ 的计算公式分别为:

$$T_{sc,n} = \frac{C_n}{E_n} \quad (3)$$

$$T_{V2G,n} = \frac{C_n}{V2G_n} \quad (4)$$

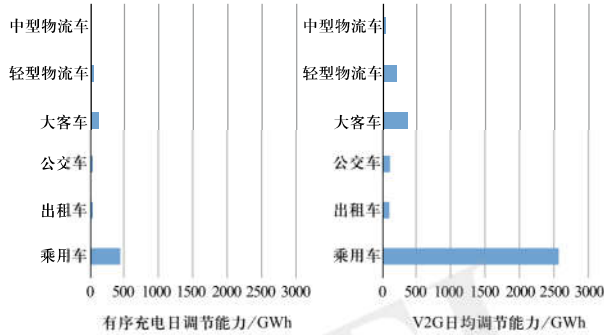


图3 电动汽车储能日均调节能力

Fig. 3 Average daily regulation capacity by EV types

图4列举了有序充电和V2G下，各类车型的储能可调节周期。可见由于出行强度较低，电动乘用车的储能周期最长（接近2周）。其他车型的储能周期一般在1周以内。若采用V2G方式，由于充放电强度增大，储能周期普遍在日内。总体而言，电动汽车储能可满足日内调节需求。虽然有序充电的调节周期相对更长，但要满足周以上的调节，电动汽车储能存在一定障碍。

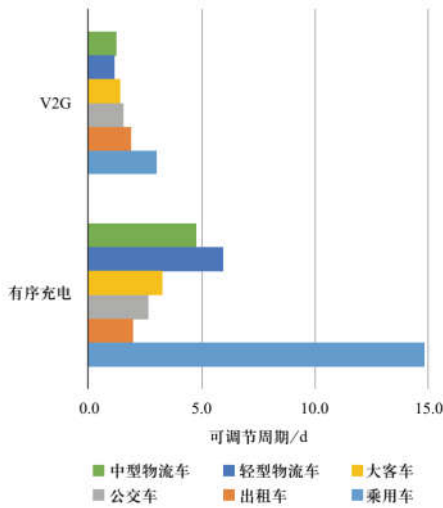


图4 各类电动汽车储能可调节周期

Fig. 4 Maximum regulation duration by EV types

1.3 电动汽车储能消纳可再生能源作用

电动汽车储能可以提供电力系统调峰、调频等服务，提升电力系统安全经济运行能力，而是否能够满足未来高渗透率可再生能源电力系统灵活性调节的需要，是衡量电动汽车储能作用的直观指标。

近年来由于技术日趋成熟，可再生能源发电成本快速下降，装机规模不断增长。截至2018年底，全国风电、太阳能光伏发电合计装机达到3.6亿kW，占全国发电总装机容量接近20%。国内多家研究机构也对未来中国可再生能源发展规模进行了预测。本文采用国家可再生能源中心“既定政策情景”的预测，即到2030年全国风电和光伏发电的装机将分别达到4.9亿kW和10.4亿kW^[18]。

风电、光伏发电等可再生能源的波动性体现在不同时间尺度。例如风电的波动集中在季节性差异，而光伏发电的波动集中在日内变化。煤电、天然气发电、需求响应等调峰因素也将影响可再生能源消纳效果，为聚焦电动汽车储能的调节效果评估，本文仅考虑电动汽车灵活性资源对风电、光伏发电波动性的调平效果。由于电动汽车储能主要提供日内、周内储能调节资源，首先从日内、周内两个时间维度评估2030年可再生能源的波动水平，其中日内波动量为每小时风电、光伏发电合计出力与日平均值的差值求和，而周内波动为每日风电、光伏发电合计出力与周平均值的差值求和，再基于冬季、夏季两个典型周的计算结果推算全年波动量，即

$$V_H = \frac{(V_{H,winter} + V_{H,summer})}{2} \times 365 \quad (5)$$

$$V_D = \frac{(V_{D,winter} + V_{D,summer})}{2} \times 52 \quad (6)$$

$$V_{H,winter/summer} = \sum_{i=0}^n P_{w,i} + P_{s,i} - \overline{P_{ws,H}} \quad (7)$$

$$V_{D,winter/summer} = \sum_{j=0}^m P_{w,j} + P_{s,j} - \overline{P_{ws,D}} \quad (8)$$

式中： V_H 、 V_D 分别为可再生能源全年日内、周内波动量； $V_{H,winter}$ 、 $V_{D,winter}$ 分别为冬季可再生能源日内、周内波动量； $V_{H,summer}$ 、 $V_{D,summer}$ 分别为夏季可再生能源日内、周内波动量； $P_{w,i}$ 、 $P_{w,j}$ 分别为小时*i*、日*j*风电发电电量； $P_{s,i}$ 、 $P_{s,j}$ 分别为小时*i*、日*j*光伏发电电量； $\overline{P_{ws,H}}$ 、 $\overline{P_{ws,D}}$ 分别为平均每小时、每日可再生能源平均发电电量。

计算得到冬季、夏季可再生能源日内波动电量分别为1403 GWh/d和1744 GWh/d，全年日内波动电量为574 TWh；冬季、夏季可再生能源周内波动量分别为202 GWh/d和480 GWh/d，全年周内波动量为124 TWh；全年日内、周内波动量合计为698 TWh。

对比1.2节电动汽车储能潜力分析结果,则2030年8640万辆电动汽车若通过有序充电方式参与电网储能,可满足15亿kW风电、光伏发电装机33.8%日内、周内波动性发电调节需求;若采用车网互动的方式,该比例将达到179.2%。可见,电动汽车储能潜力完全满足甚至超过因大规模可再生能源并网产生的新增短周期电力平衡需求。

2 电动汽车储能经济性

电动汽车储能的市場应用前景同时受到电动汽车储能成本与政策环境两方面因素影响。不同的应用场景将决定电动汽车储能的收益,而电动汽车储能成本相对固定。比如有序充电的成本取决于用户对改变充电行为的接受度和智能充电设施投资成本,而V2G储能方式的成本主要由电池成本决定,其在各类应用场景中的经济性水平也取决于电池成本下降速度。

2.1 电动汽车储能成本

电动汽车与电网互动系统的硬件成本主要来自于车端或充电桩和电网端增加的控制和功率互动装置成本,从各国有关研究来看,有序充电互动对每个终端的合理成本增幅可控制在1000元以内。国际清洁交通组织(International Council on Clean Transportation, ICCT)汇总了近期国外机构锂电池包成本下降预测,业内普遍认为到2020年单位kWh锂电池包成本将降低至150~200美元/kWh(1050~1400元/kWh),到2030年进一步降低至70~100美元/kWh(500~700元/kWh),相比2017年提出100美元/kWh的成本下限预测又有下降^[9]。

电动汽车通过V2G也可实现与有序充电类似的峰谷价差套利效果,但相比有序充电,V2G在充电桩端和车载电池端的成本都将明显提升。考虑到当前动力电池的续航及循环寿命,目前电动汽车V2G的经济性仍然偏低。

2.2 电动汽车储能效益

2.2.1 有序充电

低谷充电是电动汽车储能最为直接的商业应用场景。电动汽车储能的收益主要体现为与电网互动带来的系统成本降低或者用户充电费用的节省,但要实现与电网的互动也会在用户侧带来一定投资成本。以居

民小区有序用电的互动平台以及专业运营商来看,有序充电的主要收益近中期来自于以下3个方面。

1) 降低配电网改造和报装成本。目前这部分成本虽然很多时候由电网企业承担,但随着责权利对等的价格机制逐步理顺,这部分成本将逐步由专业化运营商或者用户承担,通过有序充电带来的配电成本下降比例有望超过30%。

2) 低谷电价充电套利。电动汽车可通过在电价低谷阶段充电降低充电成本。比如浙江省不满1 kV“一户一表”居民峰谷差价约为0.28元/kWh,上海市“一户一表”居民峰谷差价达到0.31~0.49元/kWh。随着居民负荷增加以及电价机制逐步理顺,居民峰谷差价将逐步和工商业电价峰谷差靠近。

3) 电力市场交易。通过互动平台作为集聚商,小区有序用电还可以参与系统调峰以及分布式发电交易获取其他收益。

对于日均行驶里程40 km的电动私家车用户,车辆百km电耗15 kWh,年均充电量约2738 kWh。目前国内多地居民用户可自愿选择峰谷电价,峰谷电价差集中在0.2~0.3元/kWh之间,当居民用电峰谷差价为0.3元/kWh,若有序用电可将用户高峰/低谷充电电量比从80%:20%转变为40%:60%,则有序充电年度峰谷差收益为263元,折现率8%下动态回收期5.2年,内部收益率达到22%,经济性相当显著。从目前各地居民用户峰谷电价看,上海、安徽、浙江等省市电动乘用车有序充电经济性相对更高。

2.2.2 V2G

电动汽车通过V2G也可实现与有序充电类似的峰谷价差套利效果,但相比有序充电,V2G在充电桩端和车载电池端的成本都将明显提升。考虑到当前动力电池的续航及循环寿命,电动汽车V2G的经济性仍然偏低。但随着动力电池性能提升和成本下降,V2G的经济性也将相应提高。如图5所示,虚线部分是基于2015—2018年免购置税车型车载电池容量数据、循环寿命假设及出行强度假设得到的动力电池满足道路交通出行后的剩余充放电能力(kWh/辆)。其中,横轴代表车辆全生命周期30万km出行里程所对应的电池剩余充放电能力为0。可见2018年后新售电动汽车将开始具有交通出行外剩余的充放电能力。到2025年新车的剩余充放电能力将有望超过3万kWh/辆。若按0.3元峰谷价差计算,则届时V2G车辆全生命周期峰谷调节收益将接近1万元。

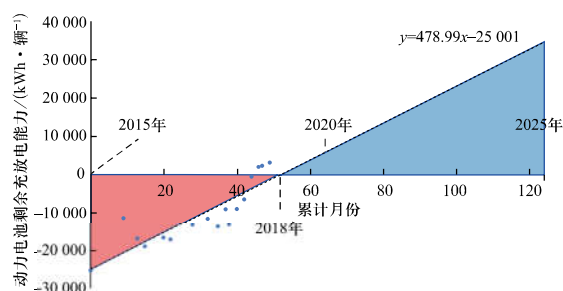


图5 电动汽车动力电池剩余充放电能力预测

Fig. 5 EV residual discharging capacity forecast

3 电动汽车储能前景探讨

3.1 战略定位

随着电动汽车普及和其车网互动能力的不断加强，应首先明确电动汽车储能在未来能源系统中的功能定位。相比固定式储能电站，电动汽车储能具有显著的规模优势。理论上，基于动力电池剩余充放电能力的电动汽车储能的经济性也高于固定储能电站。但电动汽车储能同时存在地理分布、车辆属性等方面的局限性。

首先，电动汽车一般位于低压用户侧，在缓解电网输电阻塞、降低发电侧新能源弃电等方面的价值相对有限。相比之下，固定储能可根据需要分布于发电侧和系统侧，地理布置的灵活度更高。第二，电动汽车提供的储能服务基于电动汽车车主行为，个体用车行为的变化将直接影响车辆储能效果，单辆电动汽车储能服务的规律性、可靠性、可控性偏低。相反，固定储能往往针对电力系统具体场景定制设计，其运行也较少受到人为因素干扰。第三，电动汽车储能本质采用锂离子电池技术，且车辆属性明显，意味着其更适合提供小时级或日内短周期的充放电服务。而抽水蓄能、压缩空气、氢能等固定储能方式单位能量存储成本更低，更能够适应高渗透率可再生能源电力系统下季节性调峰需求。

基于以上考虑，电动汽车储能更适应用户侧分时电价管理、降低容量/需量电费、以及参与电能现货市场和调频市场等提升电力系统运行效率、降低系统供电成本的经济性应用场景。在一定条件下，电动汽车也可起到一定的日间调峰和缓解部分输电线路阻塞的作用。但在黑启动、备用电源、无功支撑等保障电力系统安全，以及季节性调峰方面，电动汽车储能的局限性相对较大。图6对电动汽车V2G对各类电

力系统应用的适应性进行了定性归纳，其中浅蓝色部分代表电动汽车储能适应性较高的应用场景。相比V2G，电动汽车有序充电虽能通过改变充电时间实现负荷转移的“虚拟储能”效果，从而达到与V2G类似的电力系统应用价值，但认定有序充电原始负荷基线具有一定难度，其对聚合服务商的组织能力有更高要求。

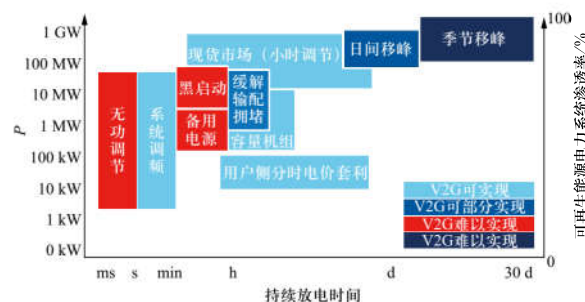


图6 电动汽车储能应用场景示意图

Fig. 6 EV energy storage applications in the power system

3.2 政策建议

随着中国电动汽车数量规模的不断扩大，挖掘电动汽车储能潜力对中国电力系统转型具有重要战略意义。但目前电动汽车的储能应用还存在技术和政策障碍。技术层面，电池技术的不断进步正使电动汽车储能具备技术经济可行性，未来的难点更多集中在如何加快配电网升级，使其能够适应电动汽车实时充放电转换和功率波动。政策层面，首先应落实峰谷分时充电电价，同步探索实时充放电价格机制，并保证价格信号能够充分传导至桩端；其次应明确电动汽车等负荷侧灵活性资源在电力市场中的地位，完善辅助服务市场规则，合理降低其在功率、放电时长等方面的技术门槛；第三，应加快储能市场交易机制研究，通过机制创新优化电动汽车储能调度策略；最后，作为分散于用户侧的灵活性资源，基于先进信息和通信技术的聚合模式创新也是实现电动汽车储能的必要条件。

参考文献

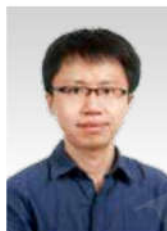
- [1] International Energy Agency. Global EV outlook 2019: scaling-up the transition to electric mobility[R/OL]. (2019)[2019-10-08]. https://webstore.iea.org/download/direct/2807?fileName=Global_EV_Outlook_2019.pdf.
- [2] 工业和信息化部. 2018年汽车工业经济运行情况[EB/OL]. (2019-01-16)[2019-10-08]. <http://www.miit.gov.cn/newweb/>

- n1146312/n1146904/n1648362/n1648363/c6600517/content.html.
- [3] 国家发展和改革委员会. 关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见[EB/OL]. (2018-06-21)[2019-10-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201806/t20180629_960951.html.
- [4] DALLINGER D, KRAMPE D, WIETSCHEL M. Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 302-313.
- [5] HAN S, HAN S, SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.
- [6] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [7] 自然资源保护协会. 电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究[R/OL]. (2016-09)[2019-10-08]. <http://nrdc.cn/information/informationinfo?id=63&cook=2>.
- [8] 自然资源保护协会. 电动汽车储能技术潜力及经济性研究[R/OL]. (2018-02)[2019-10-08]. <http://nrdc.cn/information/informationinfo?id=184&cook=2>.
- [9] 刘坚, 胡泽春. 电动汽车作为电力系统储能应用潜力研究[J]. 中国能源, 2013, 35(7): 32-37.
LIU Jian, HU Zechun. Potential research of taking EVs as energy storage for the power system[J]. Energy of China, 2013, 35(7): 32-37(in Chinese).
- [10] ZHOU C K, QIAN K J, ALLAN M, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1041-1050.
- [11] BASHASH S, MOURA S J, FORMAN J C, et al. Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 541-549.
- [12] LUNZ B, YAN Z X, GERSCHLER J B, et al. Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs[J]. Energy Policy, 2012, 46: 511-519.
- [13] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会, 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [14] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源展望2018[R/OL]. (2018-10)[2019-10-08]. <http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2018-10-22-541.html>.
- [15] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10(in Chinese).
- [16] LUND H, KEMPTON W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G[J]. Energy Policy 2008, 36(9): 3578-3587.
- [17] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29(in Chinese).
- [18] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源展望2018[R/OL]. (2018-10)[2019-10-08]. <http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2018-10-22-541.html>.
- [19] The International Council on Clean Transportation. Top global EV markets and what they tell us about the transition to electric[R]. Electricity, Electric Vehicles & Public Policy Oxford Institute for Energy Studies Workshop, Oct. 31, 2018.

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2019-11-20。

作者简介:

刘坚 (1983), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为储能、新能源汽车、氢能、可再生能源领域技术经济性及市场政策研究, E-mail: liuj@eri.org.cn。



刘坚

(责任编辑 李锡)